

УДК: 519.8

Некоторые особенности взаимосвязи термодинамических характеристик земной поверхности с потоками водяного пара и диоксида углерода на сплошной свежей вырубке

Н. В. Белотелов^{1,а}, Т. Г. Апалькова², В. В. Мамкин³,
Ю. А. Курбатова³, А. В. Ольчев^{3,4}

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук,
Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, кор. 2

² Московский политехнический университет,
Россия, 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38

³ Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова Российской академии наук,
Россия, 109071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33

⁴ Географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

E-mail: ^аbelotel@mail.ru

Получено 10.10.2017, после доработки — 27.11.2017.

Принято к публикации 30.11.2017.

В статье рассматриваются некоторые особенности временной изменчивости и взаимосвязь эксергии коротковолнового и длинноволнового излучения с потоками тепла, водяного пара (H_2O) и диоксида углерода (CO_2) на сплошной свежей вырубке в смешанном хвойно-мелколиственном лесу в Тверской области. На основе проведенного сравнения коэффициентов радиационной эффективности и эффективности эксергии, введенных Ю. М. Свиричевым, было показано, что в течение первых восьми месяцев после проведения сплошной рубки лесная экосистема функционирует как «тепловая машина», то есть на вырубке доминируют процессы диссипации энергии над продукционными процессами. Для проверки справедливости полученного вывода был выполнен статистический анализ временной изменчивости метеорологических рядов наблюдений и данных по среднесуточным значениям потоков явного тепла, затрат тепла на испарение и потоков CO_2 с применением тригонометрических многочленов, который подтвердил полученный ранее вывод. Для среднесуточных значений потоков CO_2 , валовой первичной продуктивности растительного покрова на вырубке, а также потоков явного тепла удалось построить статистические модели, линейно зависящие от эксергии коротковолнового и длинноволнового излучения. Анализ этих зависимостей также подтвердил вывод, полученный на основе рассмотрения временной изменчивости коэффициентов радиационной эффективности и эффективности эксергии. Используя разбиение временных рядов на отдельные временные интервалы «весна–лето» и «лето–осень», удалось выявить, что в процессе зарастания вырубки травянистой растительностью в летние месяцы связь между этими параметрами и величиной эксергии усиливается. Анализ линейной связи временных рядов затрат тепла на испарение и эксергии показал ее статистическую незначимость. В свою очередь, линейная связь между затратами тепла на испарение и температурой оказалась статистически значимой. Температура выступала в роли ключевого фактора, повышающего точность модели, а эксергия оказывалась несущественным фактором. Это указывает на то, что межсуточная временная изменчивость испарения активно зарастающей вырубки определялась главным образом температурой.

Ключевые слова: сплошная вырубка, термодинамические характеристики, эксергия, коротковолновая радиация, длинноволновое излучение, временные ряды, потоки тепла, водяного пара и диоксида углерода

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-14-00956-П).

© 2017 Николай Вадимович Белотелов, Тамара Геннадьевна Апалькова,
Вадим Витальевич Мамкин, Юлия Александровна Курбатова, Александр Валентинович Ольчев

UDC: 519.8

Some relationships between thermodynamic characteristics and water vapor and carbon dioxide fluxes in a recently clear-cut area

N. V. Belotelov^{1,a}, T. G. Apal'kova², V. V. Mamkin³,
Yu. A. Kurbatova³, A. V. Olchev^{3,4}

¹ Institute of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS,
Vavilov st. 40, Moscow, 119333, Russia

² Moscow Polytechnic University,
Bolshaya Semenovskaya st. 38, Moscow, 107023, Russia

³ A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Science,
Leninsky Prosp. 33, Moscow, 109071, Russia

⁴ Faculty of Geography, Moscow State University,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia

E-mail: ^abelotel@mail.ru

Received 10.10.2017, after completion — 27.11.2017.

Accepted for publication 30.11.2017.

The temporal variability of exergy of short-wave and long-wave radiation and its relationships with sensible heat, water vapor (H₂O) and carbon dioxide (CO₂) fluxes on a recently clear-cut area in a mixed coniferous and small-leaved forest in the Tver region is discussed. On the basis of the analysis of radiation and exergy efficiency coefficients suggested by Yu.M. Svirezhev it was shown that during the first eight months after clear-cutting the forest ecosystem functions as a "heat engine" i.e. the processes of energy dissipation dominated over processes of biomass production. To validate the findings the statistical analysis of temporary variability of meteorological parameters, as well as, daily fluxes of sensible heat, H₂O and CO₂ was provided using the trigonometrical polynomials. The statistical models that are linearly depended on an exergy of short-wave and long-wave radiation were obtained for mean daily values of CO₂ fluxes, gross primary production of regenerated vegetation and sensible heat fluxes. The analysis of these dependences is also confirmed the results obtained from processing the radiation and exergy efficiency coefficients. The splitting the time series into separate time intervals, e.g. "spring–summer" and "summer–autumn", allowed revealing that the statistically significant relationships between atmospheric fluxes and exergy were amplified in summer months as the clear-cut area was overgrown by grassy and young woody vegetation. The analysis of linear relationships between time-series of latent heat fluxes and exergy showed their statistical insignificance. The linear relationships between latent heat fluxes and temperature were in turn statistically significant. The air temperature was a key factor improving the accuracy of the models, whereas effect of exergy was insignificant. The results indicated that at the time of active vegetation regeneration within the clear-cut area the seasonal variability of surface evaporation is mainly governed by temperature variation.

Keywords: clear-cut, thermodynamic characteristics, exergy, short-wave radiation, long-wave emission, time series, sensible heat water vapor and carbon dioxide fluxes

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 965–980 (Russian).

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 14-14-00956).

1. Введение

Наблюдаемый в последние годы повышенный интерес исследователей к изучению термодинамики экологических систем обусловлен целым рядом факторов, и прежде всего потребностью выявления основных механизмов взаимодействия природных экосистем с окружающей средой, включая описание причинно-следственных связей этого взаимодействия, а также разработку универсальных подходов для определения термодинамических параметров экосистем, в том числе с применением методов дистанционного зондирования [Brunsell, Schymanski, Kleidon, 2011; Jorgensen et al., 2007; Kay, Fraser, 2001; Puzachenko et al., 2011, 2013, 2016; Ольчев 2016]. Использование таких термодинамических характеристик, как энтропия и эксергия, для целостного описания состояния растительности представляет собой актуальную задачу, поскольку потенциально позволяет в каком-то смысле унифицировать описание состояния растительности и его динамики, а также облегчить проведение дистанционного мониторинга растительного покрова [Kay, Schneider, 1992; Puzachenko et al., 2013].

Понятие эксергии было впервые введено в техническую термодинамику во второй половине XX века. Начиная со второй половины XX века оно стало использоваться при исследовании экологических задач. основополагающими исследованиями в этой области послужили работы Йоргенсена и Свирежева [Jorgensen, Mejer, 1982; Jorgensen, Svirezhev, 2004]. Эксергия — это *максимальная* работа, которую может совершить макроскопическая система при квазистатическом переходе из заданного состояния в состояние равновесия с окружающей средой, играющей роль термостата. В последнее время сформировалось целое новое направление экологических исследований, получившее название «эксергический анализ систем» [Jorgensen et al., 2007]. Считается, что в своем развитии экосистемы стремятся к максимизации эксергии, то есть они стараются увеличить свою свободную энергию для увеличения своей жизнеспособности. Источником свободной энергии выступает поступающий в экосистему поток солнечной радиации.

При анализе динамики и функционирования экосистем в настоящее время в качестве основных индикаторов их состояния наиболее часто рассматриваются потоки диоксида углерода (CO_2) и водяного пара (H_2O), формируемые в результате действия комплекса биофизических и биохимических процессов, протекающих в растительности и почве, а также ветрового и турбулентного режима в приземном слое атмосферы [Ibrom et al., 1996, 2008; Ольчев, 2015; Ольчев и др., 2017а; Olchev et al., 2015]. В связи с этим актуальной задачей является рассмотрение возможной связи результирующих потоков CO_2 и H_2O в атмосфере с динамикой изменений термодинамических характеристик в природных экосистемах с различной степенью антропогенной нарушенности. В частности, чрезвычайно важным вопросом является изучение возможных связей составляющих CO_2 и H_2O обмена с основными термодинамическими характеристиками, а также тенденций их изменения в процессе вторичной сукцессии растительности на нарушенных территориях. Изучению этих вопросов в последнее время посвящено большое количество исследований [Голубятников, Денисенко, 2010; Jimenez-Mufioz et al., 2012]. Основное внимание уделялось в основном изучению особенностей и механизмов изменения термодинамических характеристик в глобальном масштабе и на больших интервалах времен. При этом термодинамические характеристики растительных сообществ в локальном масштабе для относительно небольших интервалов времени до недавнего времени почти не рассматривались.

В рамках проведенного исследования была сделана попытка оценки возможной взаимосвязи термодинамических характеристик, и прежде всего эксергии, с эколого-физиологическими особенностями обмена CO_2 и H_2O на сплошной свежей вырубке, расположенной в южнотаежной зоне европейской территории России, на протяжении первого года после проведения лесохозяйственных мероприятий.

2. Объект исследований

В качестве основного объекта исследования в работе была выбрана сплошная свежая вырубка площадью около 4.5 га, расположенная в зоне рационального природопользования Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (Тверская область, Нелидовский район, 56°26' с. ш., 33°03' в. д.) [Mamkin et al., 2016; Ольчев и др., 2017a]. Исследуемая территория относится к атлантико-континентальной европейской области умеренного климатического пояса с умеренно-теплым летом и продолжительной холодной зимой с устойчивым снежным покровом. В течение года регион находится под преобладающим влиянием умеренных морских и континентальных воздушных масс. Изменчивость атмосферной циркуляции создает на исследуемой территории большую неустойчивость режима увлажнения и температуры [Ольчев и др., 2017б]. Растительный покров района исследований представлен типичными для южной тайги растительными сообществами. Преобладают различные типы ельников, включая неморальные (с липой, кленом и вязом), широколиственные (с дубравными видами), папоротниковые, зеленомошные, кисличные, чернично-кисличные, черничные и сфагново-черничные. Встречаются сосняки сфагновые осоково-брусничные с болотными кустарничками. Широко распространены верховые сфагновые болота.

Сплошная рубка леса на исследуемом участке была произведена в марте–апреле 2016 г. [Mamkin et al., 2016]. После расчистки вырубленного участка и вывоза древесины на вырубке оставалось большое количество пней, полуразложившегося древесного опада и порубочных остатков. Древесный ярус вырубленного участка леса был образован главным образом елью с участием березы и осины.

Для проведения непрерывных наблюдений за потоками тепла, H_2O и CO_2 на исследуемой сплошной вырубке в начале апреля 2016 года была установлена мачта-трипод CM106B (Campbel Sci. Inc., США) высотой 3 м с оборудованием для проведения микроклиматических наблюдений и измерения турбулентных потоков тепла, H_2O и CO_2 методом турбулентных пульсаций (eddy covariance). Оборудование включало акустический 3-компонентный анемометр Gill WindMaster Pro (Gill Instruments, Великобритания) и газоанализатор открытого типа LI-7500A (LI-COR Inc., США). Для получения данных о температуре и относительной влажности воздуха, атмосферном давлении, количестве осадков, а также о скорости и направлении ветра на высоте 2 м над земной поверхностью была установлена автоматическая метеостанция WXT520 (Vaisala, Финляндия). Потоки длинноволновой и коротковолновой радиации измерялись 4-компонентным радиометром NR01 (Hukseflux, Нидерланды), а фотосинтетически активная радиация (ФАР) — датчиком LI-190SB (LI-COR Inc., США). Измерения были начаты 7 апреля 2016 года, сразу же после вывода с вырубки лесозаготовительной техники, и проводились непрерывно в течение всего вегетационного периода, до конца октября 2016 г. [Mamkin et al., 2016; Ольчев и др., 2017].

3. Понятие эксергии

Рассмотрим основные теоретические положения, связанные с понятием эксергии. В соответствии с основными представлениями термодинамики вся энергия, поступающая в экосистему, расходуется на совершение некоторой полезной работы: на создание первичной продукции, испарение влаги (транспирацию), поддержание и накопление внутренней энергии, а также на тепловую диссипацию в виде явного потока тепла и дыхания экосистемы. «Полезная» работа экосистемы проявляется прежде всего в поддержании круговорота воды в экосистеме и обеспечении биопродукционного процесса. При этом остальная часть поглощенной энергии расходуется на потоки тепла и дыхание [Jorgensen, Svirezhev, 2004]. Если рассмотреть локальную лесную экосистему как систему, находящуюся под влиянием условий внешней среды, то в случае, когда работа совершается в экосистеме внешними силами, связанными с окружающей средой, ее принято считать положительной. Соответственно, отрицательная работа связана с обратным воздействием экосистемы на окружающую среду.

Максимальная работа, которую может совершить макроскопическая система при квазистатическом переходе из заданного состояния в состояние равновесия с окружающей средой, играющей роль термостата, называют эксергией. В случае постоянства температуры, давления и химических потенциалов окружающей среды она определяется разностью свободных энергий Гиббса [Сивухин, 1975]. Как уже было отмечено во введении, этот термин первоначально появился в работах по технической термодинамике в 70-е годы прошлого века, а потом был заимствован экологами для термодинамического описания функционирования экосистем. Эксергией (Ex) называется «максимальная» работа, осуществляемая системой при движении последней к термодинамическому равновесию с окружающей средой: $|A_{\max}| = Ex$ [Jorgensen, Svirezhev, 2004]. Эксергия равна разности потенциалов Гиббса системы в текущий момент и в момент достижения ею термодинамического равновесия с окружающей средой.

Считается, что природные экосистемы, благодаря потоку поступающей извне энергии, стремятся удалиться от термодинамического равновесия. Основной принцип «эксергического анализа систем» формулируется следующим образом: экосистемы стремятся развиваться в направлении роста эксергии.

Несмотря на то что эксергия системы есть мера способности системы совершить некоторую работу, она при этом работой в узком смысле слова не является. Для того чтобы совершить работу, необходимо рассмотреть рабочее тело и конкретизировать понятие экосистемы. Рассмотрим в качестве экосистемы земную поверхность и некоторый столб атмосферного воздуха, расположенного над ней. Рабочим телом будем считать фотоны коротковолновой и длинноволновой радиации разных спектральных диапазонов. Тогда, согласно Йоргенсену и Свирежеву [Jorgensen, Svirezhev, 2004], можно показать, что эксергия определяется выражением $Ex = (E^{in} - R) \cdot \left[K + \ln \left((E^{in} - R) / E^{in} \right) \right]$, где $R = E^{in} - E^{out}$ — радиационный баланс (E^{in} — интегрированная по частотам входящая в систему энергия, E^{out} — исходящая энергия, а $K = \frac{E_s^{out}}{E_s^{in}} \ln \left(\frac{E_s^{out}}{E_s^{in}} \frac{E^{in}}{E^{out}} \right) + \frac{E_l^{out}}{E_l^{in}} \ln \left(\frac{E_l^{out}}{E_l^{in}} \frac{E^{in}}{E^{out}} \right)$ — мера Кульбака, которая учитывает изменения спектров входящего и исходящего излучения). В последней формуле нижние индексы соответствуют: s — коротковолновой радиации, а l — длинноволновой [Jimenez-Mufioz et al., 2012].

Соотношение, приведенное выше, является ключевым при развитии методик по определению термодинамических характеристик земной поверхности, в том числе с применением данных дистанционного зондирования. Отметим, что все переменные, входящие в это выражение, вычисляются по спектрам входящего и исходящего излучения, которое может быть измерено как вблизи земной поверхности, так и в верхних слоях атмосферы. Заметим, что при увеличении числа разбиений по спектральным диапазонам излучения в выражении для меры Кульбака появляются дополнительные слагаемые, учитывающие измеряемые спектральные интервалы. Таким образом, эксергия системы, по существу, является характеристикой изменений свободной энергии входящего и исходящего излучения, а радиационный баланс есть разница «интегралов по частотам» тех же потоков радиации.

Безусловно, проследить в какой части и в каких реальных процессах в экосистеме происходят изменения этих величин, невозможно. Это связано с необратимостью процессов и неравновесностью реальных экосистем. Тем не менее можно применить аналогию, связанную с образом тепловой машины, и рассмотреть величины, похожие на коэффициент полезного действия тепловой машины, который появляется в цикле Карно. Это было сделано в работе [Jorgensen, Svirezhev, 2004], в которой вводятся два безразмерных коэффициента: $\eta_R = R / E^{in}$ и $\eta_{Ex} = Ex / E^{in}$. Первый коэффициент авторы называют радиационной эффективностью, а второй — коэффициентом эффективности эксергии. Первое отношение описывает часть энергии, поглощенной поверхностью, а второе отношение авторы интерпретируют как «информационную» или «продуцирующую» часть энергии, которая идет на увеличение продукции экосистемы.

Йоргенсенем и Свирежевым [Jorgensen, Svirezhev, 2004] была сформулирована также следующая гипотеза: если реализуется случай $\eta_{Ex} < \eta_R$, то активная поверхность работает как классическая термодинамическая машина, осуществляя механическую и химическую работу (что можно интерпретировать как превышение дыхания экосистемы над ее продукцией). А в другом случае — $\eta_{Ex} > \eta_R$ — активная поверхность работает как информационная машина, производя информацию, которую можно интерпретировать как доминирование продукционных процессов над процессами дыхания и разложения органического материала.

4. Результаты и их обсуждение

В работе для оценки термодинамических характеристик поверхности выбранной сплошной свежей вырубki на протяжении первого года после проведения лесохозяйственных мероприятий на первом шаге, с использованием гипотезы Ю. М. Свирежева, был оценен тип функционирования участка земной поверхности, занятой свежей вырубкой, а на втором шаге был проведен анализ связи временных рядов среднесуточных значений экспериментальных данных по потокам CO_2 , явного и скрытого тепла, а также по ключевым метеорологическим параметрам, с временной изменчивостью эксергии.

Значение эксергии рассчитывалось по измеренным суммарным суточным значениям входящей и исходящей длинноволновой и коротковолновой радиации. На основании полученных данных оценивались значения параметров η_{Ex} , η_R и их разности $\eta_{Ex} - \eta_R$ (рис. 1).

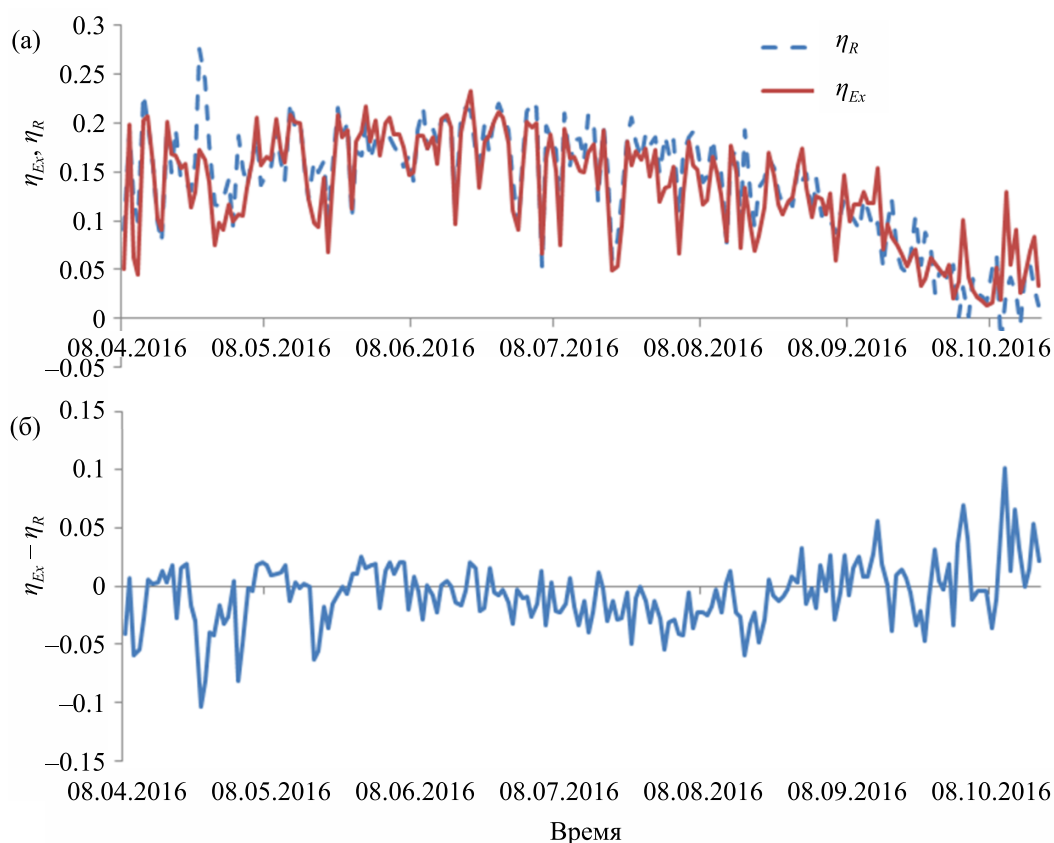


Рис. 1. Временная изменчивость (а) абсолютных значений коэффициента эффективности эксергии η_{Ex} и коэффициента радиационной эффективности η_R ; (б) разности коэффициентов эффективности эксергии и коэффициента радиационной эффективности ($\eta_{Ex} - \eta_R$) за весь период наблюдений

На рис. 1 хорошо видно, что в течение почти всего периода наблюдений выполняется соотношение $\eta_{Ex} < \eta_R$, из чего следует, что исследуемая свежая вырубка функционирует как «тепловая машина», то есть на вырубке доминируют процессы диссипации энергии над продукционными процессами. Исключение составляют осенние месяцы, когда разность $\eta_{Ex} - \eta_R$ переходит в область положительных значений. Максимальные значения разности $\eta_{Ex} - \eta_R$ характерны для конца лета, что можно интерпретировать как незначительное увеличение валовой первичной продукции экосистемы вырубки вследствие ее зарастания травянистой и кустарничковой растительностью.

Выводы о работе экосистемы как классической термодинамической машины были получены на основании использования достаточно общего критерия, который был сформулирован выше. При их получении мы не использовали большинство экспериментальных данных, имевшихся в нашем распоряжении. Поэтому следующим этапом исследования был анализ временных рядов эксергии и других экспериментальных данных, имевшихся в наличии с целью более детальной оценки влияния эксергии на изменения первичной продуктивности, потоков CO_2 , потоков явного тепла и затрат тепла на испарение.

При анализе временных рядов y_i ($i = 1, \dots, 5$, см. таблицу 1) была использована процедура разбиения временного ряда фактических наблюдений на две составляющие [Седелев, 2009], детерминированную и случайную. Предварительный анализ временных рядов для метеорологических характеристик и измеренных потоков показал, что во временной изменчивости каждого параметра четко выделяются колебательные тенденции. В связи с этим временные ряды моделировались выражением $y_i = f_i(t) + \varepsilon_i$, где первое слагаемое представляет собой периодическую функцию времени, а второе – случайное значение. Рассматривались функции вида

$$f_i(t) = a_{0i} + a_{1i} \cdot t + a_{2i} \cdot t^2 + \sum_{k=1}^m (c_{ki} \cdot \cos(\omega_k t) + b_{ki} \sin(\omega_k t)).$$

Коэффициенты a_{0i} , a_{1i} , a_{2i} , b_{ki} , c_{ki} оценивались методом наименьших квадратов, а значения частот соответствовали годовой, годовой за вычетом зимнего периода, полугодовой, сезонной, месячной и декадной периодике. То есть брались следующие значения частот: $\omega_1 = \frac{2\pi}{360}$,

$$\omega_2 = \frac{2\pi}{270}, \quad \omega_3 = \frac{2\pi}{180}, \quad \omega_4 = \frac{2\pi}{90}, \quad \omega_5 = \frac{2\pi}{30}, \quad \omega_6 = \frac{2\pi}{10}.$$

Процедуре оценки предшествовала проверка тесноты линейной связи слагаемых (факторов t , t^2 , $\cos(\omega_k t)$, $\sin(\omega_k t)$) с результативными признаками y_i (поскольку эти слагаемые входят в выражение для $f(t)$ линейно). Кроме того, проводилась проверка перечисленных факторов на мультиколлинеарность [Айвазян, Мхитарян, 1998].

В окончательную спецификацию моделей, описывающую тенденцию временных рядов, были включены только компоненты, достаточно хорошо связанные с y_i и при этом не коррелированные между собой. «Достаточно высоким» считался коэффициент парной корреляции, превышающий по модулю 0.6. Также предполагалось, что отсутствие линейной связи наблюдается, если он составляет менее 0.3 по модулю.

После применения метода наименьших квадратов и получения искомых оценок параметров анализировалось качество модели по критериям, описанным ниже. Доля вариабельности исходного ряда, объясненная моделью, оценивалась при помощи коэффициента детерминации (R^2). Величину R^2 можно считать показателем точности модели: чем ближе его значение к единице, тем лучше функция $f(t)$ аппроксимирует моделируемый временной ряд. Величина $(1 - R^2)$, в свою очередь, показывает долю необъясненной вариабельности.

Для оценки статистической значимости полученных методом наименьших квадратов оценок параметров a_{0i} , a_{1i} , a_{2i} , b_{ki} , c_{ki} применялся критерий Стьюдента. Если расчетное значе-

ние дроби Стьюдента, найденное по формуле $t_{расч}(\theta) = \frac{|\hat{\theta}|}{S_{\theta}}$, где $\hat{\theta}$ — оценка параметра, S_{θ} —

стандартная ошибка оценки параметра, превышало табличное $t_{таб}$, найденное для уровня значимости $\alpha = 0.05$ и числа степеней свободы $n - p$ (n — количество наблюдений, p — число оцениваемых параметров), то оценка соответствующего параметра признавалась статистически значимой. В противном случае принималась гипотеза о равенстве оценки параметра нулю, иными словами — о ее статистической незначимости.

Далее оценивалась случайная компонента ε_i на соответствие условиям теоремы Гаусса–Маркова [Айвазян, Мхитарян, 1998; Седелев, 2009]. Для всех оцененных моделей выполнялись предположения о нулевом математическом ожидании и об отсутствии тенденции в остатках, гарантирующие несмещенность оценок параметров (то есть равенство математического ожидания оценки истинному значению параметра). Для некоторых моделей, однако, не выполнялись предпосылки о постоянстве дисперсии остатков, а также об отсутствии в них автокорреляции, из чего следует, что, во-первых, эффективность оценок параметров модели не гарантирована и, во-вторых, стандартные ошибки параметров, S_{θ} , занижены, поэтому оценка их статистической значимости по критерию Стьюдента не может быть проведена корректно. Под эффективной оценкой параметра понимается та, которая обладает минимальной дисперсией. Неэффективная оценка, таким образом, не является максимально точной. Тем не менее мы считали, что полученные модели данных представляют определенный интерес. Они представлены в таблице 1.

Таблица 1. Уравнения моделей временных рядов. В квадратных скобках указаны стандартные ошибки коэффициентов моделей

	Модель	Доля объясненной вариабельности результативного признака (R^2)
Эксергия (y_1)	$y_1 = 5.17 + 3.61 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{270}t\right) + \varepsilon_1$ [0.17; 0.24]	0.54
Поток CO ₂ (y_2)	$y_2 = 2.87 + 1.06 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{270}t\right) + \varepsilon_2$ [0.07; 0.10]	0.38
Явный поток тепла (y_3)	$y_3 = 20.67 + 21.52 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{270}t\right) + \varepsilon_3$ [1.17; 0.24]	0.46
Затраты тепла на испарение (y_4)	$y_4 = 26.42 + 41.84 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{360}t\right) + \varepsilon_4$ [2.0; 2.94]	0.51
Экосистемное дыхание (y_5)	$y_5 = 7.36 - 3.10 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{180}t\right) - 2.79 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{180}t\right) + \varepsilon_5$ [0.10; 0.13; 0.14]	0.83
Первичная продукция (y_6)	$y_6 = 4.23 - 1.97 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{180}t\right) - 3.14 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{180}t\right) + \varepsilon_6$ [0.08; 0.11; 0.11]	0.87
Радиационный баланс (y_7)	$y_7 = 5.19 + 3.9 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{270}t\right) + \varepsilon_7$ [0.16; 0.23]	0.61
Альбедо (y_8)	$y_8 = 23.758 - 0.126 \cdot t + 0.002 \cdot t^2 + \varepsilon_8$ [2.95; 0.07; 0.0003]	0.41
Температура (y_9)	$y_9 = 5.22 + 12.78 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{360}t\right) + \varepsilon_9$ [0.4; 0.6]	0.70

На рис. 2, 3 приведены в качестве иллюстрации графики временных рядов эксергии и потока CO_2 .



Рис. 2. Графики зависимости наблюдаемых значений эксергии от времени (сплошная линия) и модель временного ряда эксергии ($y_1 = 5.17 + 3.61 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{270}t\right) + \varepsilon_1$) (пунктирная линия). Параметры статистически значимы с вероятностью ошибки 0.01, при этом 46 % вариальности эксергии объясняется не включенными в модель факторами ($R^2 = 0.54$)

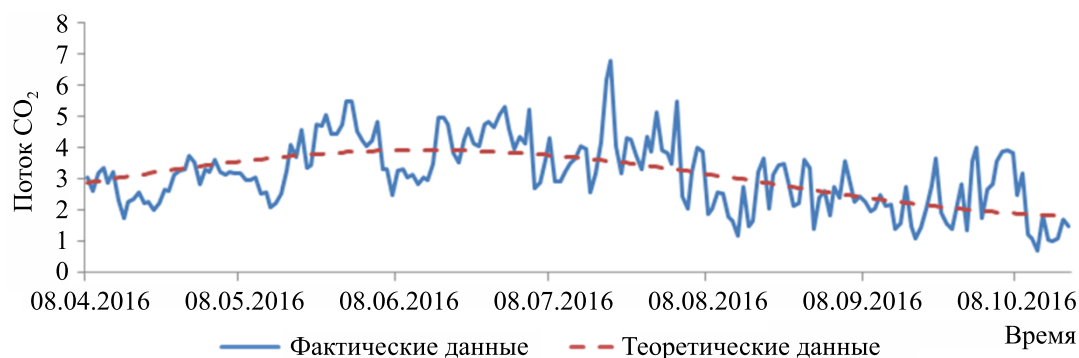


Рис. 3. Графики зависимости наблюдаемых значений потока CO_2 в $\text{гС м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ от времени (сплошная линия) и модель временного ряда потока CO_2 ($y_2 = 2.87 + 1.06 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{270}t\right) + \varepsilon_2$) (пунктирная линия). Параметры статистически значимы с вероятностью ошибки 0.01, при этом 62 % вариальности потока CO_2 объясняется не включенными в модель факторами ($R^2 = 0.38$)

Далее полученные модели временных рядов экспериментальных данных исследовались на предмет наличия линейной связи между соответствующей переменной и эксергией. Так же как и в случае построения моделей для одного показателя, временные ряды моделировались выражениями вида

$$y_i = a_{1i} \cdot t + a_{2i} \cdot t^2 + \sum_{k=1}^m (c_{ki} \cdot \cos(\omega_k t) + b_{ki} \sin(\omega_k t)) + \beta_i \cdot y_1 + \delta_i,$$

с добавлением линейного по эксергии члена ($\beta_i \cdot y_1$). Процедура построения таких моделей полностью аналогична описанной выше.



Рис. 4а. График зависимости валовой первичной продукции в $\text{гС м}^{-2} \text{день}^{-1}$ от времени (сплошная линия) и модель временного ряда валовой первичной продукции с учетом линейной зависимости от эксергии.

Уравнение модели имеет вид $y_6 = 3.57 - 1.69 \cos\left(\frac{2\pi}{180}t\right) - 3.29 \sin\left(\frac{2\pi}{180}t\right) + 0.1 \cdot y_1 + \delta_6$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.87$

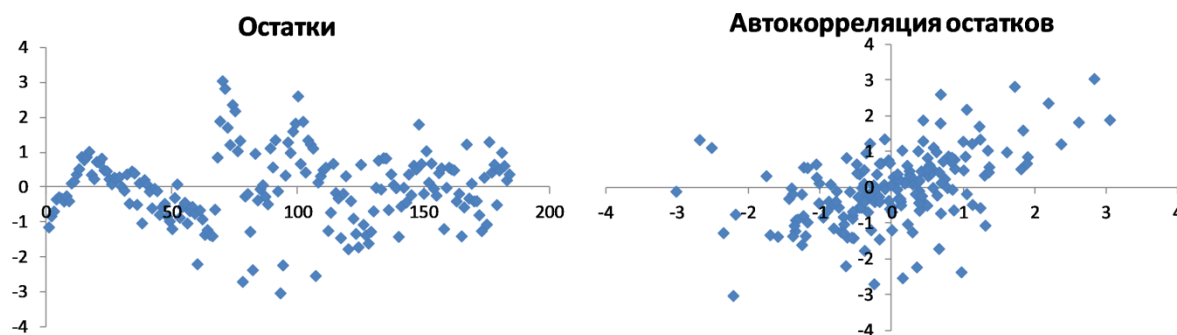


Рис. 4б. Диаграмма рассеяния остатков для модели временного ряда валовой первичной продукции с учетом линейной зависимости от эксергии (δ_6) и их автокорреляция

На основе построенных моделей для определенных параметров удалось выявить их устойчивую связь с эксергией. Так, в частности, удалось найти линейную зависимость между эксергией и валовой первичной продукцией активно восстанавливающейся на вырубленном участке травянистой и древесной растительности. Выявленная зависимость представлена на рис. 4.

Диаграмма рассеяния остатков и автокорреляционное поле для модели зависимости валовой первичной продукции от эксергии показывают (рис. 4б), что на основе тестов Голдфелда–Квандта и Дарбина–Уотсона [Айвазян, Мхитарян, 1998] остатки гетероскедастичны и автокоррелированы. Оба этих нарушения предпосылок теоремы Гаусса–Маркова приводят к потере эффективности оценок параметров уравнения. Нулевое математическое ожидание и отсутствие тенденции позволяют сделать вывод, что оценки параметров не смещены. Добавление к исходной модели зависимости первичной продуктивности от времени эксергии в качестве влияющего фактора повысило долю объясненной вариабельности первичной продуктивности незначительно, на несколько десятых процента (см. таблицу 1). Это позволяет сделать вывод о наличии незначительной линейной связи между эксергией и валовой первичной продукцией.

Для более тщательного анализа зависимости валовой первичной продуктивности от эксергии в течение вегетационного сезона была выполнена следующая процедура: временная часть модели оставалась неизменной, а коэффициент при эксергии оценивался на усеченном времен-

ном ряду. В результате были выявлены следующие закономерности. Так, если рассматривать временной ряд с середины лета до осени и использовать ту же временную функцию, то значение коэффициента детерминации модели будет выше, чем при моделировании полного ряда наблюдений ($R^2 = 0.88$). Точность модели и доля объясненной вариабельности первичной продукции повышались при этом на 1 %. Коэффициент при эксергии увеличивался до 0.16. Это можно интерпретировать как увеличение в процессе зарастания вырубki тесноты связи между валовой первичной продукцией и эксергией. Это может свидетельствовать о том, что в течение зарастания вырубki эффективность использования солнечной радиации земной поверхностью для создания первичной продукции увеличивается.

Анализ модели временной динамики потока CO_2 $y_2 = 2.87 + 1.06 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{270}t\right) + \varepsilon_2$ показал, что функция времени объясняет только 37.8 % изменчивости потока CO_2 (см. таблицу 1), на прочие факторы приходится 62.2 %. Кроме того, в остатках модели наблюдается тенденция к увеличению разброса, т. е. нарушается предпосылка теоремы Гаусса–Маркова о случайности остатков, что приводит к смещению оценок параметров уравнения. Включение в модель эксергии в качестве объясняющего фактора не привело к существенному увеличению доли объясненной вариабельности потока CO_2 , параметр при показателе «эксергия» оказался статистически незначимым. Тем не менее удалось построить более качественную с точки зрения значимости оценок параметров модель вида $y_2 = 2.2 + 0.15 \cdot y_1 + \delta_2$, точность которой составила $R^2 = 0.19$. При этом не менее 19 % вариабельности CO_2 обмена объясняется эксергией. Полученный результат не говорит о полном отсутствии связи потока CO_2 и эксергии, а лишь о низкой степени проявления линейной связи. Линейная связь между потоком CO_2 и эксергией можно интерпретировать как доминирование процессов дыхания над созданием первичной продукции. Выявление нелинейных связей показателей с эксергией в рамках данной работы не проводилось.

Достаточно интересна связь, выявленная между явным потоком тепла и эксергией (см. рис. 5, а): она линейна с нулевым свободным членом. Это подтверждает полученный ранее вывод о том, что вырубka в среднем за летний период работает как «тепловая машина». Модель характеризуется небольшой автокорреляцией остатков (рис. 5, б), о чем свидетельствуют автокорреляционное поле и результаты теста Дарбина–Уотсона, но при этом остатки гетероскедастичны и их математическое ожидание не равно нулю. Следовательно, оценки параметров модели смещены и неэффективны.

Если, как и в случае с анализом связи валовой первичной продукции с эксергией, рассмотреть сезонную динамику, используя усеченные временные ряды, то на протяжении периода с весны до середины лета значение коэффициента детерминации модели ниже, чем при моделировании всего ряда наблюдений полностью ($R^2 = 0.70$), что может говорить об увеличении связи продукционных процессов с эксергией в конце вегетационного периода. Данная закономерность указывает на уменьшение связи между явным потоком тепла и эксергией в процессе зарастания вырубki.

При анализе возможной зависимости между затратами тепла на испарение и эксергией линейной связи выявить не удалось. Уравнение модели, описывающей связь затрат тепла на испарение с эксергией, имеет вид $y_4 = 34.14 + 2.71 \cdot y_1$. Коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0.17$, т. е. модель объясняет только 17 % вариабельности затрат тепла на испарение. При этом параметры уравнения статистически значимы. Значительная доля необъясненной вариабельности не позволяет признать качество этой модели достаточно хорошим. Диаграмма рассеяния остатков и автокорреляционное поле позволяют предположить наличие в остатках автокорреляции (см. рис. 6).

Попытки построить модель в форме зависимости затрат тепла на испарение от эксергии и температуры, а также в форме линейной комбинации синусов и косинусов одинаковых частот, температуры и эксергии не дали положительного результата: в обоих случаях коэффициент при факторе «эксергия» оказывался статистически незначимым.

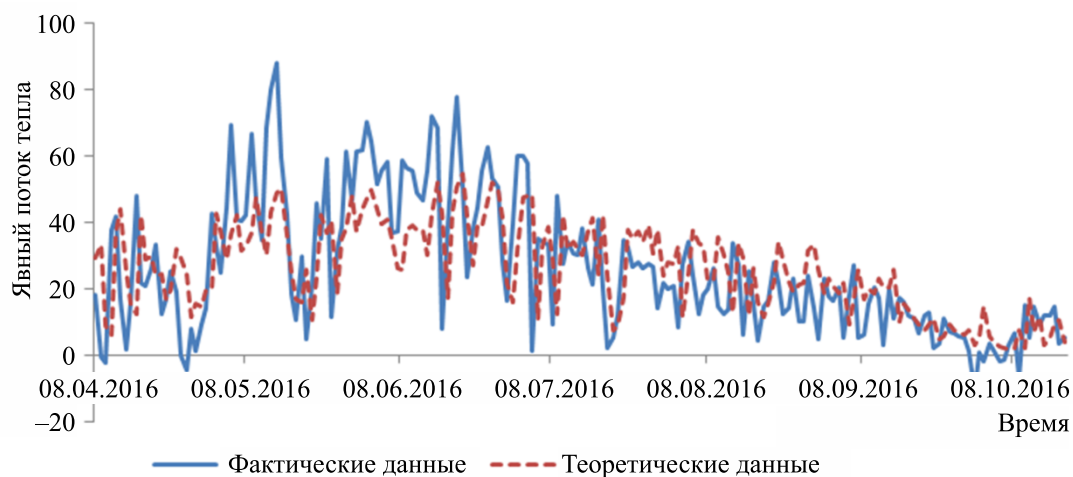


Рис. 5а. График зависимости явного потока тепла ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) от времени (сплошная линия) и модель временного ряда явного потока тепла с учетом линейной зависимости от эксергии. Уравнение модели имеет вид $y_3 = 4.3 \cdot y_1 + \delta_3$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.78$

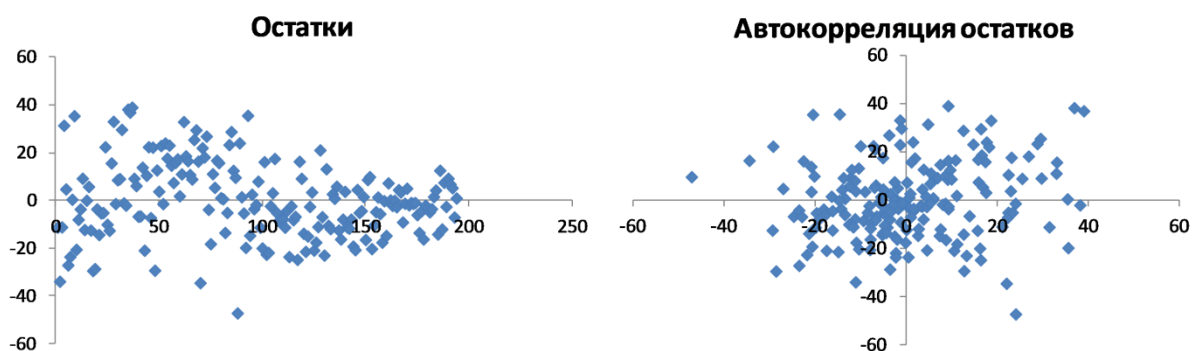


Рис. 5б. Диаграмма рассеяния остатков для модели временного ряда явного потока тепла с учетом линейной зависимости от эксергии (δ_3) и их автокорреляция

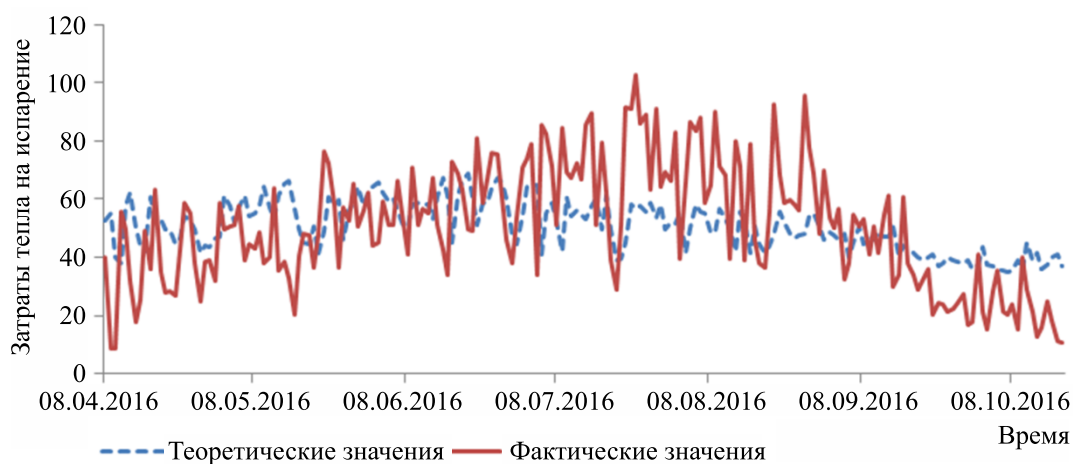


Рис. 6а. График зависимости затрат тепла на испарение ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) от времени (сплошная линия) и модель временного ряда затрат тепла на испарение с учетом линейной зависимости от эксергии. Уравнение модели имеет вид $y_4 = 34.14 + 2.71 \cdot y_1 + \delta_4$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.17$

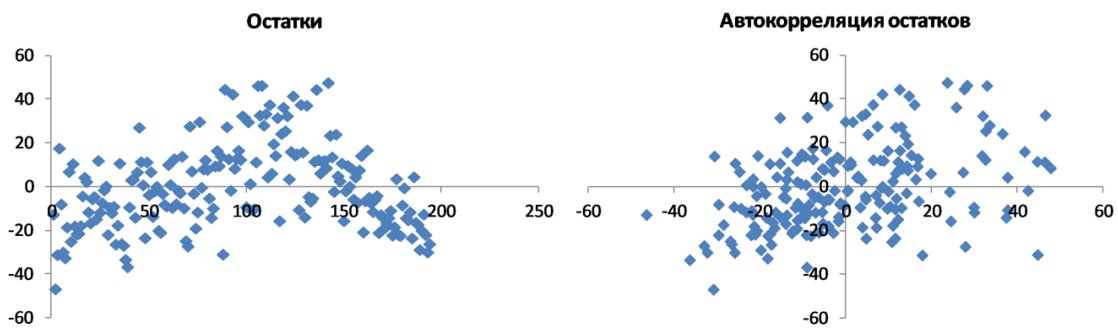


Рис. 6б. Диаграмма рассеяния остатков модели временного ряда затрат тепла на испарение с учетом линейной зависимости от эксергии (δ_4) и их автокорреляция

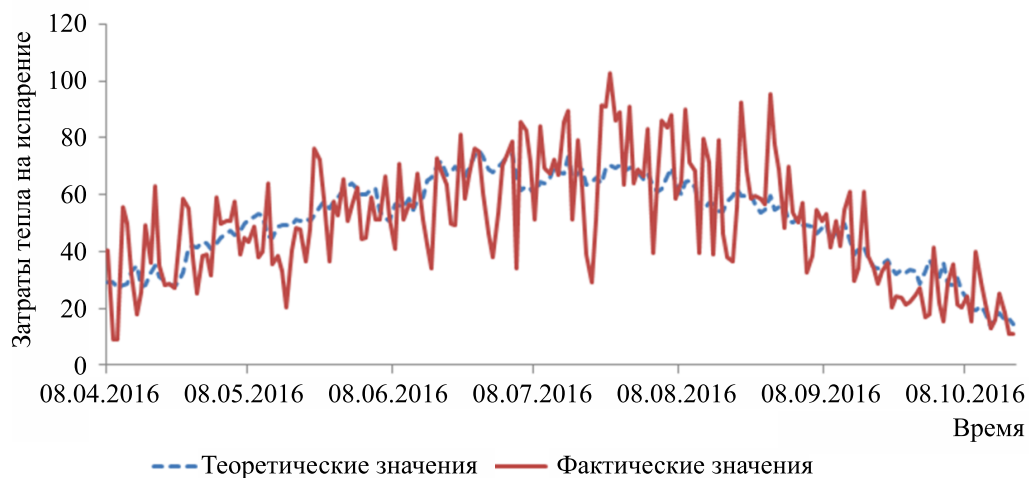


Рис. 7а. График зависимости затрат тепла на испарение ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) от времени (сплошная линия) и модель временного ряда затрат тепла на испарение с учетом линейной зависимости от температуры. Уравнение модели имеет вид $y_4 = 19.47 + 24.82 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{360}t\right) + 1.33 \cdot y_9 + \tilde{\delta}_4$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.55$

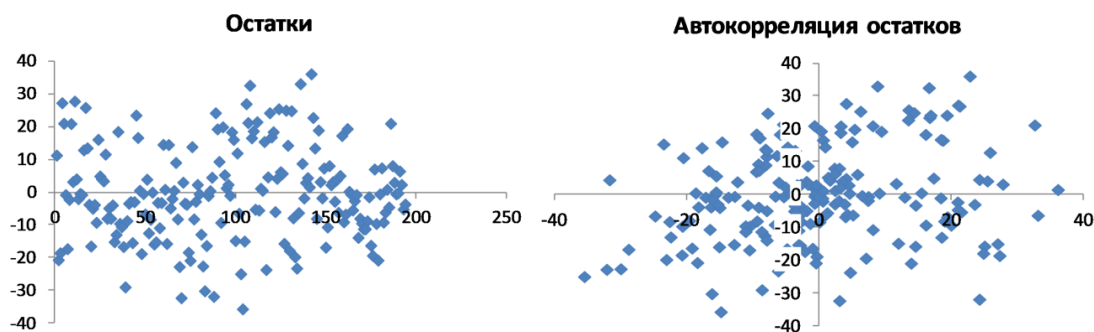


Рис. 7б. Диаграмма рассеяния остатков модели временного ряда затрат тепла на испарение с учетом линейной зависимости от температуры ($\tilde{\delta}_4$) и их автокорреляция

А вот модель зависимости затрат тепла на испарение от времени и температуры оказалась вполне удовлетворительной: $y_4 = 19.47 + 24.82 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{360}t\right) + 1.33 \cdot y_9 + \delta_4$ (см. рис. 7). Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.55$; 55 % вариальности затрат тепла на испарение объясняется

функцией времени и температуры. Параметры уравнения статистически значимы, не смещены, но не эффективны, что следует из наличия автокорреляции в остатках модели.

Отсюда можно сделать вывод, что затраты тепла на испарение практически не зависят от эксергии, но линейно зависят от температуры. Это также указывает на то, что сплошная выруб-ка работает по аналогии с тепловой машиной.

Таким образом, подробный анализ временных рядов экспериментальных данных в целом не противоречит основному выводу, полученному при анализе коэффициентов радиационной эффективности и эффективности эксергии.

5. Заключение

На основании приведенных выше результатов можно сделать вывод, что в течение первых восьми месяцев после сплошной рубки существенных изменений в отклике экосистемы на изменение факторов внешней среды не происходит. С термодинамической точки зрения она «работает» как «тепловая машина», то есть на свежей вырубке доминируют процессы диссипации энергии над продукционными процессами. Это подтверждается как анализом соотношения коэффициентов η_{Ex} и η_R , так и статистическим анализом связи временных рядов валовой первичной продукции, потоков CO_2 и явного тепла с временным рядом эксергии излучения.

Моделирование временных рядов экспериментальных данных позволило показать связь среднесуточных значений эксергии с явными потоками тепла и первичной продуктивностью, а также температуры с затратами тепла на испарение, при этом температура и эксергия выступали в роли важных факторов, повышающих точность моделей. Безусловно, рассмотренные формы спецификаций моделей не являются единственно возможными, но в своем классе функций демонстрируют удовлетворительное качество, точность и несмещенность параметров, а следовательно, могут быть использованы для анализа исследуемых явлений. Так, анализ моделей временных рядов показывает, что процессы зарастания незначительно влияют на интенсивность выделения CO_2 экосистемой — она лишь незначительно снижается. Также зависимость валовой первичной продукции растительного покрова вырубки от эксергии со временем немного повышается.

Интересно отметить, что на свежей сплошной вырубке отсутствует статистически значимая связь между затратами тепла на испарение от эксергии, тогда как для смешанного леса умеренных широт линейная зависимость среднесуточных значений эксергии от затрат тепла на испарение была четко выявлена [Белотелов, Ольчев, 2016].

В заключение хотелось бы отметить, что, по-видимому, в задачах анализа процессов функционирования лесных экосистем на коротких временных интервалах после сильных повреждений среднесуточный временной ряд эксергии не следует трактовать как некоторую термодинамическую характеристику подстилающей поверхности вследствие неравновесности изучаемых процессов, а стоит интерпретировать ее как некоторую «интегральную» характеристику, учитывающую изменения спектров входящего и исходящего излучения.

Список литературы (References)

- Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. — М.: ЮНИТИ, 1998.
- Ayvazian S. A., Mkhitarin V. S. Prikladnaya statistika i osnovi econometrici [Applied statistics and bases of econometrics]. — Moscow: UNITY, 1998 (in Russian).
- Белотелов Н. В., Ольчев А. В. Использование термодинамического подхода к анализу потоков тепла, H_2O и CO_2 в лесных экосистемах // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов. — 2016. — Т. 31, № 1 (31). — С. 109–124.

- Belotelov N. V., Olchev A. V.* Ispol'zovanie termodinamicheskogo podchoda k analizu potokov tepla, H₂O i CO₂ v lesnich ekosistemach [The use of thermodynamic approach to analyse the fluxes of sensible heat, H₂O and CO₂ in forest ecosystems] // Modelirovanie, dekompoziciia i optimizaciia. — 2016. — Vol. 31, No. 1 (31). — P. 109–124 (in Russian).
- Голубятников Л. Л., Денисенко Е. А.* Термодинамический подход к оценке влияния климатических изменений на растительный покров // Журнал общей биологии. — 2010. — Т. 71. — С. 85–96.
- Golubytnikov L. L., Denisenko E. A.* Termodinamichesky podkhod k ocenke vliyuniy klimaticheskikh izmenenia na rastitel'nyy pokrov [Thermodynamic approach to assessing the impact of climate change on vegetation] // Journal of General biology. — 2010. — Vol. 71. — P. 85–96 (in Russian).
- Ольчев А. В., Авилов В. К., Байбар А. С. и др.* Леса европейской территории России в условиях меняющегося климата. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017.
- Olchev A. V., Avilov V. K., Baybar A. S. et al.* Lesa evropeiskoy territoriy Rossii v usloviykh menyushegosy klimata [Forests of European Russia under climate changes]. — Moscow: Tovarishstvo nauchnykh shkol, 2017 (in Russian).
- Ольчев А. В., Мамкин В. В., Авилов В. К., Байбар А. С., Иванов Д. Г., Курбатова Ю. А.* Сезонная динамика потоков диоксида углерода, явного и скрытого тепла на свежей сплошной вырубке в южно-таежной зоне европейской части России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — 2017б. — Т. 28, № 4. — С. 5–23.
- Olchev A. V., Mamkin V. V., Avilov V. K., Baybar A. S., Ivanov D. G., Kurbatova Ju. A.* Sezonnaya dinamika potokov dioksidov ugleroda, yavnogo i skritogo tepla na svejey sploshnoy virubke v yuzhno-taejnoj zone evropeyskoy chasti Rossii [Seasonal dynamics of fluxes of carbon dioxide, sensible and latent heat to the fresh solid cutting in the southern taiga zone of the European part of Russia] // Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling. — 2017b. — Vol. 28, No. 4. — P. 5–23 (in Russian).
- Ольчев А. В.* Потоки CO₂ и H₂O в лесных экосистемах в условиях изменяющегося климата (оценка с применением математических моделей): автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. — М.: Генезис, 2015. — С. 51.
- Olchev A. V.* Potoki CO₂ i H₂O v lesnykh ekosistemach v usloviykh izmenyushegosia klimata (s primeneniem matematicheskikh modeley) [The fluxes of CO₂ and H₂O in forest ecosystems under changing climate (estimation using mathematical models)]: abstract of the dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of biological Sciences. — Moscow: Genesis, 2015. — P. 51 (in Russian).
- Ольчев А. В.* Модельный подход к определению валовой и нетто первичной продукции лесных экосистем по величине поглощенной фотосинтетически активной радиации // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8, № 2. — С. 345–353.
- Olchev A. V.* Model'nyi podchod k opredeleniyu valovoiy i netto pervichnoiy produkcii lesnykh ekosistempo velichine pogloshhennoiy photositicheskoy aktivnoiy radiacii [A modeling approach to estimate the gross and net primary production of forest ecosystems as a function of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation] // Komp'yuternye issledovaniia i modelirovanie. — 2016. — Vol. 8, No. 2. — P. 345–353 (in Russian).
- Седелев Б. В.* Регрессионные модели и методы оценки параметров и структуры экономических процессов: учебное пособие / под. ред. В. В. Харитонов. — М.: МИФИ, 2009.
- Sedelev B. V.* Regressionniye modeli i metodiy ocenki parametrov i struktur ekonomicheskikh prosessov [The regression model and estimation of parameters and structure of economic processes]. — Moscow: MIPHI, 2009 (in Russian).
- Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. — Т. 2. — М.: Наука, 1975.
- Sivuchin D. V.* Obshiy kurs phisiki. Termodinamika i molekuliarnay phisika [General course of physics. Thermodynamics and molecular physics]. — Vol. 2. — Moscow: Nauka, 1975 (in Russian).
- Brunsell N. A., Schymanski S. J., Kleidon A.* Quantifying the thermodynamic entropy budget of the land surface: Is this useful? // Earth Syst. Dyn. — 2011. — No. 2. — P. 87–103.
- Ibrom A., Schütz C., Tworek T., Morgenstern K., Oltchev A., Falk M., Constantin J., Gravenhorst G.* Eddy-correlation measurements of fluxes of CO₂ and H₂O above a spruce forest // J. Phys. Chem. Earth. — 1996. — Vol. 21 (5-6). — P. 409–414.
- Ibrom A., Oltchev A., June T., Kreilein H., Rakkibu G., Ross Th., Panferov O., Gravenhorst G.* Variation in photosynthetic light-use efficiency in a mountainous tropical rain forest in Indonesia // Tree Physiology. — 2008. — Vol. 28. — P. 499–508.

- Jimenez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Matter C.* Recent trends in solar exergy and net radiation at global scale // *Ecological modeling*. — 2012. — Vol. 228. — P. 59–65.
- Jorgensen S. E., Svirezhev Y. M.* Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. — Langford Lane Kidlington. Oxford, Elsevier. — 2004.
- Jorgensen S. E., Marques J. C., Muller F., Nielsen S. N., Patten P. C., Tiezzi E., Ulanowicz R. E.* A New Ecology: Systems Perspective, 2004; Elsevier: New York, NY, USA, 2007.
- Kay J. J., Schneider E. D.* Thermodynamics and Measures of Ecological Integrity // *Ecological Indicators*, Proc. of the International Symposium on Ecological Indicators. — 1992. — Vol. 1. — Fort Lauderdale, Florida, Elsevier. — P. 159–182.
- Kay J. J., Fraser R. A.* Exergy Analysis of Ecosystems: Final Draft Establishing a Role for Thermal Remote Sensing. — Ontario: Univ. Waterloo, 2001.
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova Yu., Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A.* Changes in net ecosystem exchange of CO₂, latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: results from an experimental and modeling analysis. 2 // *Environmental Research Letters*. — 2016. — Vol. 11 (12). — P. 125–168.
- Olchev A., Ibrom A., Panferov O., Gushchina D., Kreilein H., Popov V., Propastin P., June T., Rauf A., Gravenhorst G., Knohl A.* Response of CO₂ and H₂O fluxes in a mountainous tropical rainforest in equatorial Indonesia to El Niño events // *Biogeosciences*. — 2015. — Vol. 12. — P. 6655–6667.
- Patterson M. G.* Ecological production based pricing of biosphere processes. Special issue: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives // *Ecological Economics*. — 2002. — No. 41. — P. 457–478.
- Puzachenko Yu., Sandlersky R., Sankovski A.* Methods of Evaluating Thermodynamics Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by Landsat Satellite // *Entropy*. — 2013. — Vol. 15. — P. 3970–3982.
- Puzachenko Y. G., Sandlersky R. B., Svirejeva-Hopkins A.* Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing // *Ecological modelling*. — 2011. — Vol. 222. — P. 2913–2923.
- Puzachenko Y. G., Sandlersky R. B., Krenke A. N., Olchev A.* Assessing the thermodynamic variables of landscapes in the southwest part of East European plain in Russia using the MODIS multispectral band measurements // *Ecological Modelling*. — 2016. — Vol. 319. — P. 255–274.
- Stay P. C., Hua Lin, Novick K. A., Siqueira M. B. S., Juang J.-Y.* The role of vegetation on the ecosystem radiative entropy budget and trends along ecological succession // *Entropy*. — 2014. — Vol. 16. — P. 3710–3731.
- Svirezhev Yu. M., Steinborn W. H.* Exergy of solar radiation: information approach // *Ecological Modelling*. — 1991. — Vol. 145. — P. 101–110.
- Svirezhev Yu. M., Steinborn W. H., Pomaz V. L.* Exergy of solar radiation: global scale // *Ecological Modelling*. — 2003. — Vol. 169. — P. 339–346.
- Ulanowicz R. E., Hannon B. M.* Life and the production of entropy // *Proc. R Soc. London Ser. B*. — 1987. — Vol. 232. — P. 181–192.